

気候変動による今後の極端降水および洪水リスクの変化

課題責任者

山田 朋人 北海道大学 大学院工学研究院

著者

星野 剛*¹, 山田 朋人*¹, 稲津 将*², 佐藤 友徳*³, Dzung Nguyen-Le*¹,
初塚 大輔*³, 杉本 志織*⁴, 川瀬 宏明*⁵

*¹北海道大学 大学院工学研究院, *²北海道大学 大学院地球環境科学研究院, *³北海道大学 大学院工学研究院, *⁴海洋研究開発機構 シームレス環境予測研究分野, *⁵気象庁 気象研究所

本研究は今後の我が国における治水計画を考える上で不可欠となる気候変動の影響による洪水リスクの変化を大量アンサンブル気候データの力学的ダウンスケーリングにより明らかにするものである。近年毎年のように発生する豪雨災害を受けて国土交通省本省や国土交通省北海道開発局、北海道は将来の洪水リスクの検討および適応策について専門家委員会を設置し議論を進めている。本研究はこれらの検討のベースとなる洪水リスクの将来変化を明らかにすることを目的に地球温暖化に資するアンサンブル気候予測データベース(d4PDF)の力学的ダウンスケーリングを実施し、北海道内の流域を対象に過去と将来の気候条件下における洪水外力を定量的に評価した。本研究ではこれまでに実施したd4PDFの力学的ダウンスケーリングに加え、新たに産業革命前から2°C気温が上昇した気候条件での大雨イベントの力学的ダウンスケーリングおよび1年間を通じた力学的ダウンスケーリングを実施したことで温暖化の進行度合いに応じた洪水リスクの評価および長期的な降雨による洪水リスクの評価を実現した。これにより、多角的な洪水リスクの評価が実現し、前述の専門家委員会を通じて適応策の検討に大きく貢献した。

キーワード：気候変動，適応策，洪水リスク，力学的ダウンスケーリング，d4PDF，気象研究所非静力学地域気候モデル NHRCM

1. 研究背景

平成27年関東・東北豪雨、平成28年北海道・東北地方での豪雨、平成29年7月九州北部豪雨、平成30年7月西日本豪雨、令和元年東日本台風による豪雨など甚大な被害をもたらす豪雨が毎年のように発生しており、これまでの経験を上回る大雨への対策の重要性が顕在化している。国土交通省北海道開発局および北海道は2016年の北海道での豪雨災害を受けて専門家委員会[1]を設置し、「気候変動による将来の影響を科学的に予測し、具体的なリスク評価をもとに治水対策を講じるべき」との内容を取りまとめた。この内容を受けて国土交通省北海道開発局および北海道は「北海道地方における気候変動予測（水分野）技術検討委員会」[2]を設置し、気候予測データに基づき北海道地方における将来の洪水リスクを定量的に評価した。さらに国土交通省北海道開発局および北海道は令和元年度から「北海道地方における気候変動を踏まえた治水対策技術検討会」[3]を設置し、洪水リスク情報に基づく具体的な適応策の検討を開始している。また、国土交通省本省は平成30年度より「気候変動を踏まえた治水計画に係る技術検討会」[4]を設置し、日本全国を対象に気候変動による大雨の将来変化量を検討している。これらの専門家委員会においては過去に発生した大雨だけでなく、気候モデルにより作成された大量アンサンブル気候予測データに基づいて議論が進められている。このように今後の治水対策を考える上で、将来の洪水リスクの評価および適応策の検討にお

いて大量アンサンブルデータをいかに利用するかが極めて重要となっている。

前述の専門家委員会においては「地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース」(d4PDF)[5]が用いられた。d4PDFは過去の気候や温暖化進行後の気候における数千年分の気候シミュレーションデータであり、洪水リスクの評価において気候システムの自由度がもたらす極端現象の生起確率を物理モデルを用いたモンテカルロ手法として推定可能とするものである。我が国ではこれまでの数十年間に渡る降雨観測から確率降雨等を基軸として治水計画が作られてきた。一方、降雨をもたらす気候システムの自由度は膨大な大きさを有しており、数十年間で各地域が経験した降雨イベントは限定的である。大量アンサンブルデータの使用は数十年間の観測に基づいて設定された確率雨量の振れ幅を推定可能とする[6]。また、洪水の被害は降雨の時空間的なパターンや事前の降雨量などにも依存するが、大量アンサンブルデータ内には様々な降雨の時空間分布や事前降雨のパターンが含まれることから、流域平均降雨量だけでなく降雨の時空間分布等を踏まえた多角的な洪水リスクの評価が可能となる。このように大量アンサンブルデータの利用は洪水リスクの評価に新たな視点を追加しうるものである。

著者らはこれまでに北海道の流域を対象にd4PDFを水平解像度5kmへと力学的にダウンスケーリング(DDS)することで観測された大雨の特徴をよく表すことを明

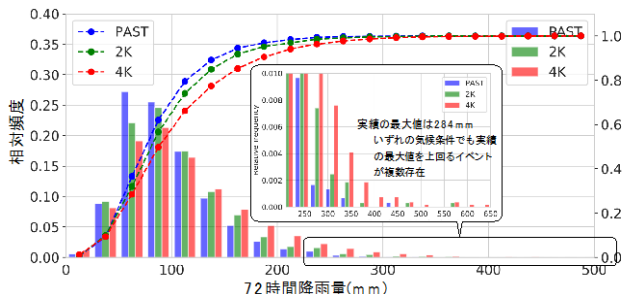


図 1 十勝川流域における DDS 実施後の降雨量の頻度分布 (青：過去実験、緑：2°C上昇実験、赤：4°C上昇実験)

らかにしており、d4PDF の過去実験と 4°C上昇実験の比較から年最大降雨の増加量を定量化した[6]。

本課題では洪水外力の逐次的な増大を踏まえた適応策の検討に向け、d4PDF の 2°C上昇実験を対象とした同様の DDS を実施した。また、2016 年台風 10 号の際には事前の連続した 3 つの台風による降雨が土壌の水分量を高め、降雨が流出しやすい状態で台風 10 号による大雨を受けたことが洪水のリスクを高めた[1]と考えられることから、1年間を通した DDS により事前の降雨量の将来変化も検討した。本研究では北海道内の十勝川帯広基準地点集水域(十勝川流域)および常呂川北見基準地点集水域(常呂川流域)を対象にそれらの影響評価を実施し、従来と温暖化進行後の洪水リスクの多角的に評価した。なお、地球シミュレータの利用により前述の専門家委員会での議論の核となる結果を短時間で得ることができ、本成果に基づいて今後の治水対策が議論された。

2. 力学的ダウンスケーリング

本研究は気象研究所非静力学地域気候モデル(NHRM)[7]を用いた DDS を実施し、流域での降雨の特徴をより精細に把握するため d4PDF の領域実験(20km 解像度)を 5km 解像度へと変換した。d4PDF 領域実験は領域気候モデルにより作成された水平解像度 20 km の気候予測データであり、長期観測データが得られる 1951 年から 2010 年の 60 年を対象に異なる初期値、海氷と海面水温に摂動を加えた 50 メンバの数値計算である過去実験(60年×50メンバ=3000年)、産業革命以前に比べて全球平均温度が 2°C上昇した世界を想定し、6種類の海面水温パターンとそれに摂動を与えた 9 メンバの数値計算を実施した 2°C上昇実験(60年×海面水温 6パターン×9メンバ=3240年)および同様に 4°C上昇した世界を想定した 4°C上昇実験(60年×海面水温 6パターン×15メンバ=5400年)で構成される。本研究では DDS の対象期間を 2種類(15日間、1年間)設定し、洪水リスクを多角的に評価した。

計画で対象とする降雨の継続時間(計画降雨継続時間)における年最大の大雨を評価するために大雨事例を対象とした 15日間の DDS を実施した。この 15日の設定にあたっては d4PDF 領域実験の各年での 6月 1日から 12月 1日までの期間で計画降雨継続時間での流域平均

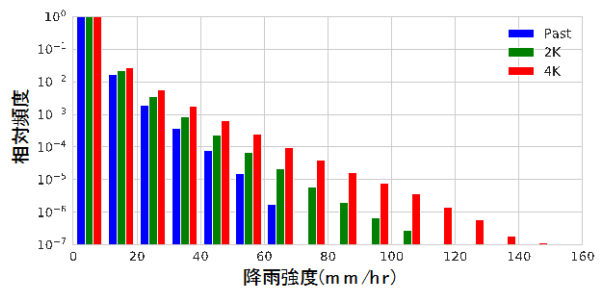


図 2 十勝川流域における DDS 実施後の 1 時間降雨強度の頻度分布 (青：過去実験、緑：2°C上昇実験、赤：4°C上昇実験)

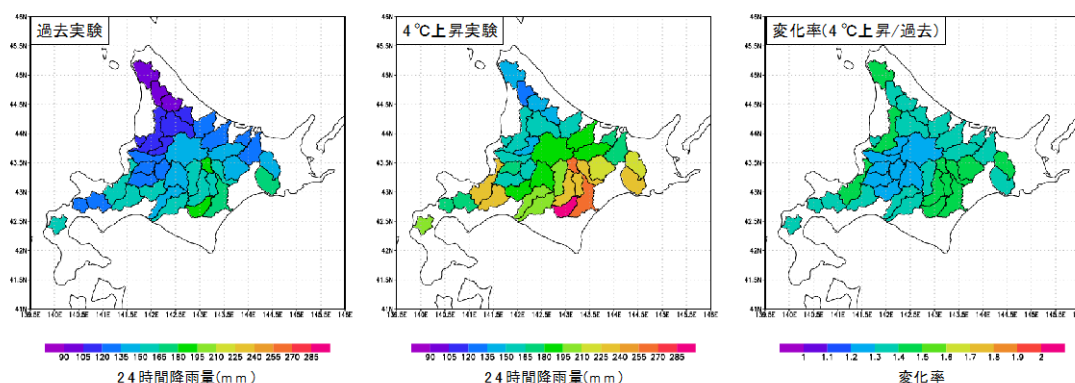
降水量が最大となる降水イベント(本研究ではこれを年最大降雨イベントと定義する)を選定した。計画降雨継続時間は十勝川流域で 72 時間、常呂川流域で 24 時間である。1年間を通した DDS(通年 DDS)は d4PDF 領域実験での十勝川流域における年最大降雨イベントの降雨量が多い順にそのイベントが含まれる 1年間を DDS の対象とした。計算は過去実験で 782 年分、4°C上昇実験で 1605 年分実施した。

3. 結果

3-1. 温暖化の進行度合いに応じた降雨の変化

図 1 に十勝川流域における DDS 実施後の年最大降雨量の頻度分布を示す。なお、ここでは DDS 実施後の各気候条件下での結果のみを示すが、過去実験における DDS 後の年最大降雨量は観測値と良好な対応関係にあることを確認している(バイアス補正係数は 0.99)[6]。この流域ではこれまでに観測された年最大降雨量の最大値は 284mm であったが、DDS 後の結果にはいずれの気候条件においてもこれを上回る事例が複数回含まれており、過去に観測された最大の降雨量と同等またはそれを上回る大雨に対して確率的な評価および洪水のリスクを把握するのに有用なデータであることがわかる。また、図 1 に示す各気候条件下の降雨量の頻度分布から温暖化の進行に伴い年最大降雨量が増大すること、すなわち適応策を講じなければ温暖化の進行とともに洪水リスクが増大することが明らかとなった。なお、ここでは十勝川流域の結果のみを示すが、常呂川流域でも同様の結果であった。図 2 に十勝川流域の年最大 72 時間降雨量イベントにおける流域内の計算グリッドの 1 時間降雨強度の頻度分布を示す。これも年最大降雨量と同様に過去実験の DDS 実施後の降雨は観測値の特徴を良く表すことを明らかにしている[6]。年最大降雨量と同様に温暖化の進行に伴い、強い 1 時間降雨の頻度が高まるのがわかる。1 時間降雨強度は気温と飽和水蒸気圧の関係式(Clausius-Clapeyron の式)と良好に対応していることが観測結果から明らかとされており[8]、DDS から得られた結果も同様にこの関係式と良好に対応することからも得られた降雨が妥当であると判断できる。

・ 流域全体、24時間降雨量の90パーセンタイル値



・ 約400km²(16グリッド)、6時間降雨量の90パーセンタイル値

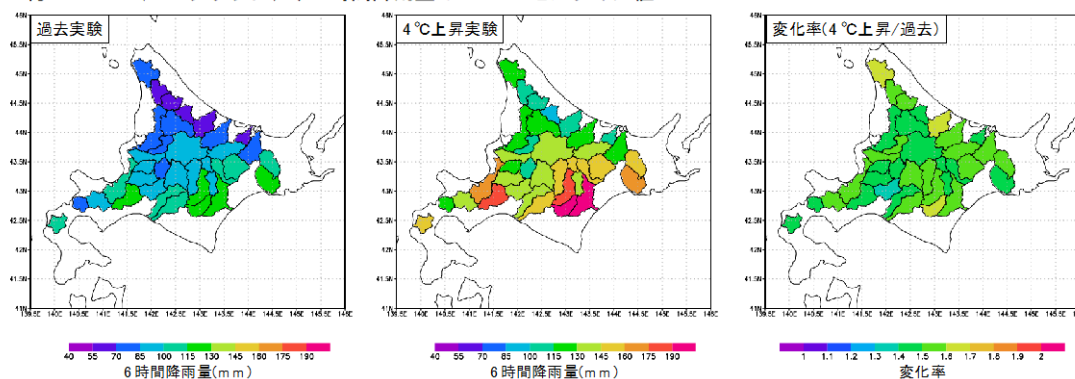


図3 通年 DDS から算出した1級水系での最大降雨量の90パーセンタイル値(上段:流域全体、24時間降雨量、下段:約400km²、6時間降雨量)。※解析途中の結果であり、過去実験:610年分、4°C上昇実験:812年分を使用した結果。

3-2. 北海道内の1級水系での降雨量変化

北海道内の全1級水系を概ね同一の面積となるように分割した流域における年最大24時間降雨量の90パーセンタイル値を図3に示す。同図よりいずれの流域でも1.2-1.5倍の降雨量の増大を示すことがわかり、このような降雨量の増大が十勝川流域や常呂川流域だけでなく、北海道全域で生ずることがわかる。図3下には降雨の時空間的な特徴を把握するために対象面積が約400km²、対象時間が6時間における降雨量の比較を示す。なお、算出方法は参考文献を参照されたい[9]。同図より、4°C上昇実験における降雨量の増加率は全流域面積、24時間を対象としたものよりも時空間を限定した条件において大きくなることわかる。これは年最大降雨が時空間的に集中化することを意味し、洪水のピーク流量の増大により洪水の危険性が高まると考えられることから、適応策の検討にあたっては降雨量の増大とともに降雨の時空間的な特徴の変化を考慮する必要がある。

3-3. 事前降雨量の変化

図4に十勝川流域における年最大72時間降雨が発生する前の1から30日前までの降雨量を示す。この図より、観測値とDDS後の過去実験、4°C上昇実験はいずれも事前降雨量の中央値は一致しており、対象日数と降雨量は線形の関係性にあることがわかる。一方で、5パーセンタイル値と95パーセンタイル値間の幅は4°C上昇

実験で増大することがわかり、将来の気候では多量の事前降雨により土壌が湿潤した状態で年最大降雨を迎える確率が高まることわかる。図5には年最大72時間降雨量と事前の30日降雨量の散布図を示す。この図より、観測値の中で事前降雨量が最も大きかった2016年台風10号時の事前降雨量に匹敵する事前降雨が両気候条件に複数含まれているほか、事前降雨と72時間降雨のどちらにも観測の最大値を上回る事例が存在することから、このような大量アンサンブルデータにはこれまでに経験のない事前降雨をおよび大雨をもたらす事例が存在することが明らかとなった。またそれらは4°C上昇実験において出現頻度が高まることわかり、多量の事前の降雨による洪水ピークの増大や土砂災害リスクといったことも考慮すべきことがわかる。

4. まとめ

地球シミュレータを用いてd4PDFの力学的ダウンスケールリングを実施し、複数の観点から洪水リスクの将来変化を評価した。過去60年の気候および温暖化の進行度合いの異なる2つの気候条件における年最大降雨イベントのDDSを実施し、温暖化の進行に伴い72時間降雨量および1時間降雨強度が増大することを明らかにした。また、1年間を通したDDSより、北海道内の全1級水系における年最大降雨量を把握し、4°C上昇実験においては全道的に降雨量が増大することを明らかとした。

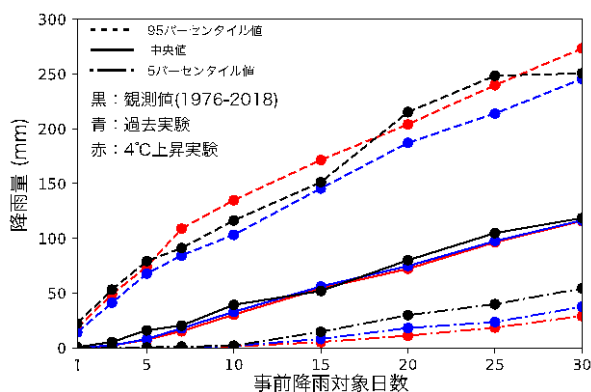


図 4 年最大 72 時間降雨の事前降雨量

時空間を限定した降雨量の増加率はより高い値を示すことから、降雨は時空間的に集中化することが明らかとなった。このような降雨の集中化はピーク流量の増大をもたらすことが予想されるため、適応策の検討においては降雨量の増大とともに考慮すべきだと考えられる。さらに通年 DDS より、事前の降雨量の大きさを評価し、将来実験においてはより土壌が湿潤な状態で大雨がもたらされる確率が高まることがわかった。また、年最大 72 時間降雨量および事前 30 日降雨量のどちらも既往最大を上回る降雨は温暖化進行後にその発生確率が増大することが示唆された。この事前降雨量の変化は洪水ピーク流量の増大や土砂災害リスクの上昇へつながることが予想されるため、適応策の検討においては事前降雨量の考慮が重要になると考えられる。

これらの成果は国土交通省北海道開発局および北海道が令和元年度に設置した「北海道地方における気候変動を踏まえた治水対策技術検討会」[3]および国土交通省本省が平成 30 年度に設置した「気候変動を踏まえた治水計画に係る技術検討会」[4]での議論の中核をなし、本成果に基づいて今後の治水対策が議論されている。これは従来の観測値に基づく洪水外力の設定から観測とシミュレーション結果を駆使して予測した将来の大雨に備える治水対策のパラダイムシフトとなるものである。また、本成果は国際連合 UNFCCC において Mokssit IPCC 事務局長をはじめとする各国の政府関係者に対して紹介された。また、オランダ企業庁の支援を受けて治水対策において先進的なオランダとの共同研究やオランダ大使館、日米土木学会合同のシンポジウムでの成果発表などを実施し、大規模シミュレーションと統計的手法に基づいた本研究成果は国際的な関心を集めている。

これらの成果は地球シミュレータの利用により前述の専門家委員会での検討に間に合うように得ることが可能となった。このような膨大なシミュレーションを活用する水防災分野での今後の政策の検討においては迅速な計算が必要であり、スーパーコンピュータの重要性は今後より一層高まるものと思われる。

謝辞

本研究の遂行にあたっては MEXT/SICAT にご支援をいただいた。また、本研究では、創生プログラムのもと

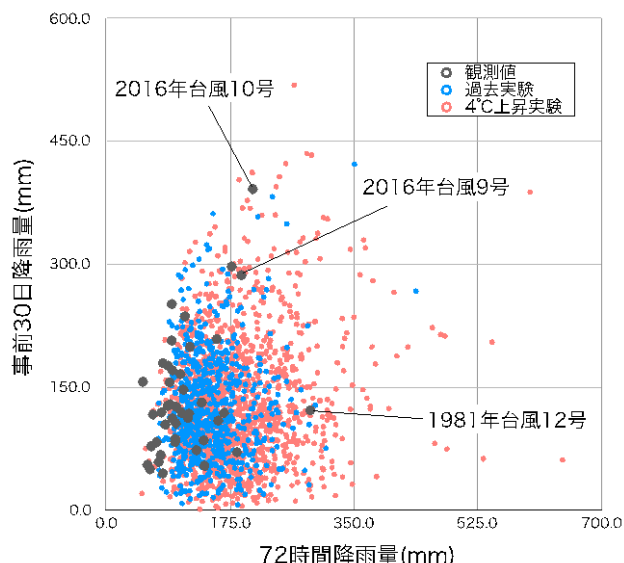


図 5 年最大 72 時間降雨量と事前 30 日降雨量 (2016 年の観測値は 2 事例をプロット)

で作成された、地球温暖化施策決定に資する気候再現・予測実験データベース (d4PDF) を使用した。ここに記して謝意を表します。

文献

- [1] 平成 28 年 8 月北海道大雨激甚災害を踏まえた水防災対策検討委員会, "平成 28 年 8 月北海道大雨激甚災害を踏まえた今後の水防災対策のあり方", 2017.
- [2] 北海道地方における気候変動予測 (水分野) 技術検討委員会, 2018.
- [3] 北海道地方における気候変動を踏まえた治水対策技術検討会, 2019.
- [4] 気候変動を踏まえた治水計画に係る技術検討会, 2019.
- [5] Mizuta, R., and Coauthors, "Over 5000 years of ensemble future climate simulations by 60 km global and 20 km regional atmospheric models", *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, pp. 1383-1393, 2016.
- [6] 山田朋人ら, "北海道における気候変動に伴う洪水外力の変化", 河川技術論文集, 第 24 巻, 391-396, 2018.
- [7] Sasaki, H., Murada, A., Hanafusa, M., Oh'izumi, M. and Kurihara, K., "Reproducibility of Present Climate in a Non-Hydrostatic Regional Climate Model Nested within an Atmosphere General Circulation Model", *SOLA*, 7, 173-176, 2011.
- [8] Yamada, T.J. and Coauthors, "Extreme precipitation intensity in future climates associated with the Clausius-Clapeyron-like relationship", *Hydrological Research Letters*, 8(4), 108-113, 2014.
- [8] 星野剛ら, "大量アンサンブル気候予測データを用いた年最大降雨の時空間特性の将来変化の把握～十勝川流域を対象として～", 土木学会論文集 G (環境), 第 74 巻, 1-25~1-31, 2018.

The Influence of Climate Change on Extreme Rainfall and Flood Risk

Project Representative

Tomohito J. Yamada

Faculty of Engineering, Hokkaido University

Authors

Tsuyoshi Hoshino ^{*1}, Tomohito J. Yamada ^{*1}, Masaru Inatsu ^{*2},
Tomonori Sato ^{*3}, Dzung Nguyen-Le ^{*1}, Daisuke Hatsuzuka ^{*3},
Shiori Sugimoto ^{*4}, Hiroaki Kawase ^{*5}

^{*1}Graduate school of Engineering, Hokkaido University, ^{*2}Graduate school of Science, Hokkaido University, ^{*3}Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University, ^{*4}Department of Seamless Environmental Prediction Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, ^{*5}Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency

It became important to develop adaptation plan for future heavy rainfall because the heavy flood events have frequently occurred in the past few years in Japan. This research examined the influence of climate change on rainfall characteristics over the river basins in Hokkaido, Japan. We conducted dynamical downscaling to make the large ensemble regional climate experiments with 5-km grid spacing from d4PDF. In this research, we added the target of dynamical downscaling which is heavy rainfall events under the 2-K warmer condition, secondary, fully 1-year dynamical downscaling for the past and 4-K warmer condition in order to evaluate flood risk from various view points. The results enables to quantify the influence of degree of global warming on annual maximum heavy rainfall and rainfall volume which fall before heavy rainfall events. This research contributed to the expert committees of adaptation planning.

Keywords: climate change, adaptation, flood risk, dynamical downscaling, d4PDF, NHRCM

1. Introduction

The heavy flood events have frequently occurred in the past few years in Japan. Those heavy rainfall led governments to consider flood risk associate with climate change and adaptation plans. This study conducted dynamical downscaling (DDS) to make the large ensemble regional climate data with 5-km grid spacing from database for Policy Decision making for Future climate change (d4PDF) [1]. In this research, we conducted DDS for heavy rainfall events under the 2-K warmer condition, secondary, fully 1-year under the past and 4-K warmer condition in order to evaluate flood risk from various view points. The downscaling for the 2-K warmer condition enables to quantify the influence of degree of global warming on annual maximum heavy rainfall volume and hourly rainfall intensity. The fully 1-year downscaling enables quantify the rainfall volume which fall before annual maximum heavy rainfall events (prior rainfall). The prior rainfall volume affect to soil moisture and can increase peak discharge (e.g. the flood event over Tokachi river basin in 2016). This research contributed to the expert committees for future flood control; one of which is organized by Hokkaido development bureau and Hokkaido prefecture and the other is organized by Ministry of Land, Infrastructure and Transport.

2. Dynamical downscaling

This research uses d4PDF which consists of large ensemble climate simulation results (Past climate: total 3,000 years, 2-K warmer climate: total 3,240 years, 4-K warmer climate: total 5,400 years) with 20 km grid spacing, for the DDS which convert the horizontal resolution from 20 km to 5 km. We conducted DDS using a regional climate model NHRCM [2] for annual maximum rainfall events over Tokachi river basin (upper area of Obihiro reference point) and Tokoro river basin (upper area of Kitami reference point) in Hokkaido, Japan under the 2-K warmer condition. The DDS for the other two conditions had already conducted under the “Strategic Project with Special Support (Grand Challenge)” of Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC) in 2017. We also conducted DDS for fully 1-year dynamical downscaling for the past and 4-K warmer condition.

3. Results

3-1. Influence of degree of global warming on heavy rainfall

Figure 1 shows frequency of the annual maximum rainfall volume over Tokachi river basin from the rainfall after DDS (d4PDF-5kmDS) and Figure 2 shows that of rainfall intensity. Both of the frequencies are similar to those of observation result [3]. The d4PDF-5kmDS includes many rainfall events which exceed maximum recorded rainfall volume, it means this dataset is effective to evaluate low probable heavy rainfall

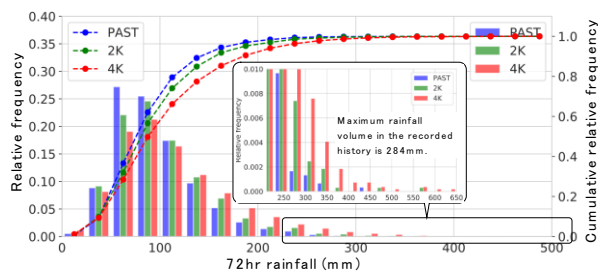


Figure 1. Frequency of the annual maximum rainfall volume over Tokachi river basin

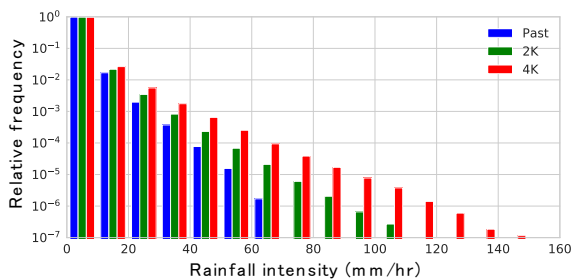


Figure 2. Frequency of rainfall intensity over Tokachi river basin

event. Both of the rainfall volume and rainfall intensity under the past, 2-K warmer and 4-K warmer climate are larger in this order.

Figure 3 shows the prior rainfall volume from 1 to 30 days before annual maximum rainfall events occurring. The figure shows that the prior rainfall volume of the Past experiment is almost same as the observation. Those of the median values are almost same, however, 95th-percentile value of the 4-K warmer experiment is bigger than the Past experiment. It suggests that rainfall events whose initial soil condition is wetted frequently occur under the warmer climate. Figure 4 shows that the annual maximum 72-h rainfall volume and prior 30-days rainfall volume. The Past and 4-K warmer experiments include rainfall events which exceed maximum values of both 72-hr rainfall volume and prior 30-days rainfall volume. Especially, the frequency of such a heavy rainfall under the 4-K warmer climate is higher than that of under the Past climate. Those rainfall events are un-experienced and required for the risk assessment.

4. Conclusion

In this research, we conducted DDS in order to evaluate flood risk from various view points. The results enables to quantify the influence of degree of global warming on annual maximum heavy rainfall and rainfall volume which fall before heavy rainfall events. This research contributed to the expert committees for future flood control.

Acknowledgement

This research is supported by the Social Implementation of Climate change Adaptation Technology (SICAT) project of

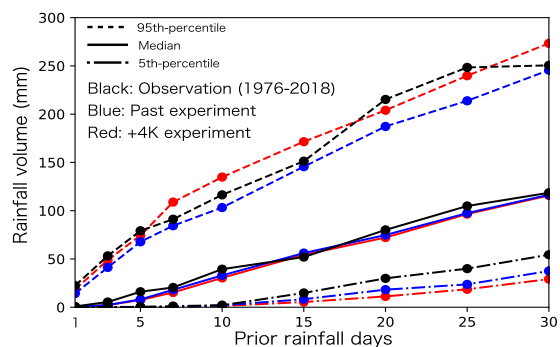


Figure 3. Prior rainfall volume over Tokachi river basin

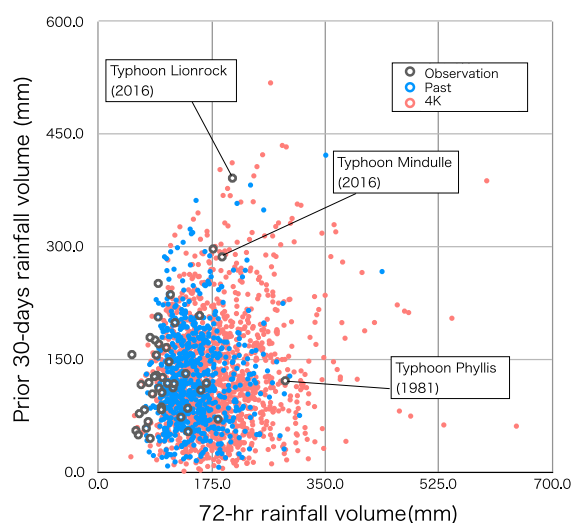


Figure 4. Annual maximum 72-hr rainfall volume and prior rainfall volume over Tokachi river basin (Two rainfall events occurred in 2016 were plotted as an exception).

the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT) of Japan. This study utilized the database for Policy Decision making for Future climate change (d4PDF), which was produced under the SOUSEI program.

References

- [1] Mizuta, R., and Coauthors, “Over 5000 years of ensemble future climate simulations by 60 km global and 20 km regional atmospheric models”, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, pp.1383-1393, 2016.
- [2] Sasaki, H., Murada, A., Hanafusa, M., Ohizumi, M. and Kurihara, K., “Reproducibility of Present Climate in a Non-Hydrostatic Regional Climate Model Nested within an Atmosphere General Circulation Model”, *SOLA*, 7, 173-176, 2011.
- [3] Yamada, J., T. and Coauthors, “The influence of climate change on flood risk in Hokkaido”, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Advances in river engineering*, 2018. (in Japanese with English abstract)